

Die Verschweißung von Leitungsdrähten aus Kupfer und Aluminium

Vom Hofe, Hans
Hofmann, Wilhelm
Sottorf, Hans

Veröffentlicht in:
Abhandlungen der Braunschweigischen
Wissenschaftlichen Gesellschaft Band 2, 1950,
S. 165-174



Friedr. Vieweg & Sohn, Braunschweig

Die Verschweißung von Leitungsdrähten aus Kupfer und Aluminium

Von **Hans v. Hofe, Wilhelm Hofmann und Hans Sottorf**

Mit 9 Abbildungen

Vorgelegt von Herrn **O. Schmitz**

Abstract: Aluminium and copper are successfully upset-welded within a cylindric form between the melting points of aluminium and of the eutecticum, $\text{Al}-\text{Al}_2\text{Cu}$, i. e. 548°C . The liquid eutecticum is formed through the contact of the two specimens only. The aluminium rod ends in the form of a flat hollow cone and the copper rod, as a pointed cone, is fitted into it. A ring-shaped slot inside the press cylinder surrounds the contact lines. Under a hammer-blow the oxyde-film is torn, aluminium and the newly formed eutecticum fill the snotch.

The tensile strength of the joint exceeds that of the aluminium rod.

Bisherige Verbindungen zwischen Aluminium und Kupfer

Verbindungen zwischen Aluminium- und Kupferstäben sind namentlich für die elektrische Leitungstechnik von Wichtigkeit. Die einfache Klemmverbindung nach Abb. 1 a ist an den Verbindungsstellen stark korrosionsgefährdet.

Klemmverbindungen unter Benutzung von Cupal-Ronden (Abb. 1 b) bedeuten demgegenüber einen erheblichen Fortschritt. Cupal ist ein durch Walzplattierung erzeugter Verbundwerkstoff aus Kupfer und Aluminium. Der Hersteller, Hetzel & Co.-Nürnberg, beschreibt das Verfahren wie folgt: Eine Kupfer- und eine Aluminiumplatte von zusammen 100 mm Dicke werden auf 560°C erwärmt, zwischen zwei Walzen unter hohem Druck hindurchgewalzt und dadurch miteinander verschweißt. Anschließend können diese Cupalplatten auf beliebige Blechstärke ausgewalzt werden, wobei das anfängliche Dickenverhältnis der beiden Schichten erhalten bleibt. Bei einer Klemmverbindung mit Cupal-Ronden ist nur noch die äußere Berührungslinie zwischen Aluminium und Kupfer korrosionsgefährdet.

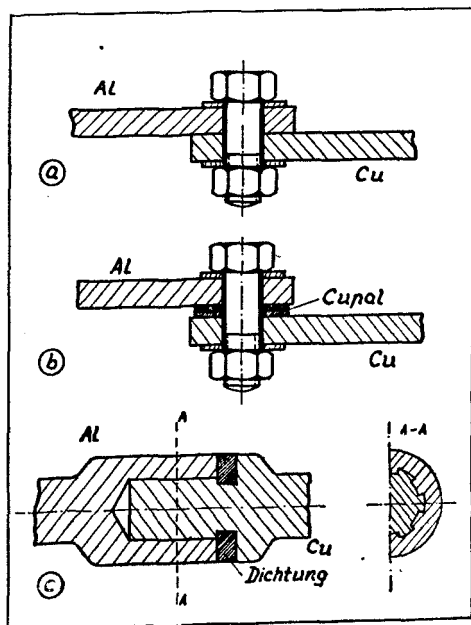


Abb. 1. Klemmverbindungen zwischen Aluminium- und Kupferleitern.

Die Verbindung zwischen Aluminium- und Kupferleitern wird häufig durch Zwischenstücke bewerkstelligt, die die Firma Hofmann-Kötschenbroda anfertigt (Abb. 1 c). Die Untersuchung ergab, daß diese Zwischenstücke durch Pressen eines mit Nuten versehenen Kupferkernes in ein Aluminiumrohr hergestellt sind. Ein Dichtungsring und Schutzanstrich verhindern den Angriff durch Luftfeuchtigkeit. Alle diese Verfahren sind hinsichtlich des Übergangswiderstandes und der Korrosionsgefahr noch unvollkommen, so daß es erstrebenswert schien, auf schweißtechnischem Wege einen Verbund zwischen Aluminium- und Kupferleitern zu erzielen.

Vorversuche

Die Schwierigkeit für die Anwendung der bekannten Schweißverfahren ist durch die sehr unterschiedlichen Schmelzpunkte von Kupfer und Aluminium gegeben, ferner durch die starke Neigung beider Metalle, bei höheren

Temperaturen Oxyde zu bilden. Das Schmelzschweißen kann keine Anwendung finden, da hierbei spröde Verbindungen zwischen Kupfer und Aluminium entsprechend dem Zustandsdiagramm (Abb. 2) entstehen. Auch die Kaltschweißung muß ausscheiden, da die erforderlichen hohen Drucke mit Verformung der Oberfläche an der Verbundstelle bei Stäben schwer zu verwirklichen sind. Die Vorversuche begannen demzufolge zunächst mit der Preßschweißung.

Einfaches Stumpfschweißen unter Berücksichtigung

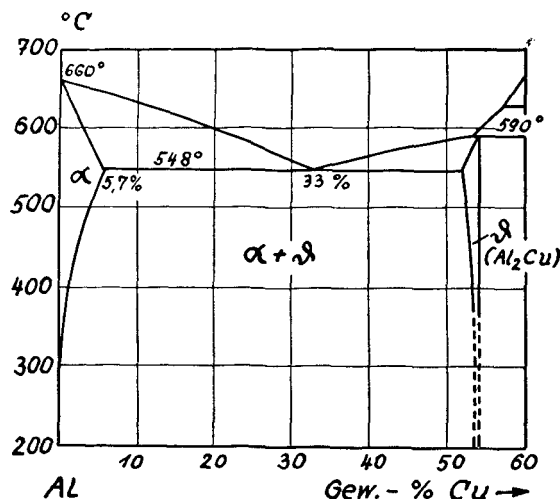


Abb. 2. Aluminiumecke des Zustandschaubildes Aluminium-Kupfer nach Hansen.

der verschiedenen Einspannlängen für Kupfer und Aluminium brachte keinen Verbund. Das Aluminium wurde bereits flüssig, als das Kupfer noch hart war. Beim Erwärmen der Stäbe nur bis zum teigigen Zustand des Aluminiums drückte sich das Kupfer in das weiche Aluminium hinein, die Oxydschicht verhinderte aber jeden Verbund. Schweißpulver ließ sich mit Rücksicht auf den erforderlichen Stromdurchgang nicht verwenden. Nun wurde das Kupfer bis zur Erweichung vorgewärmt. Hierzu verwendeten wir einmal den Schweißbrenner, dann die Stumpfschweißmaschine unter Benutzung einer Kupfergegenelektrode, die dann schnell durch einen Aluminiumstab ausgewechselt wurde. Ein Verbund konnte wieder nicht erzielt werden, da das Aluminium infolge der guten Wärmeleitfähigkeit beider Metalle an der Berührungsstelle flüssig wurde und abtropfte. Bei einem weiteren Versuch mit etwas geringerer Vorwärmung hafteten kleine Mengen Aluminium am Kupfer, und der Schliff ergab an diesen

Stellen einen Verbund zwischen beiden Metallen. Weiter wurde versucht, eine Cupal-Ronde als Zwischenglied zwischen einem Kupfer- und einem Aluminiumstab zu verwenden. Wir erhielten in der Stumpfschweißmaschine Verschweißung zwischen dem Aluminium des Cupals und dem Aluminiumleiter, auf der Kupferseite unterblieb jedoch die Verschweißung, da die Temperatur von 600° nicht ausreichte. Bei höherer Temperatur trennten sich die beiden Schichten des Cupals, und das Aluminium wurde flüssig.

Um die störende Oxydschicht zu entfernen, lag es nahe, das vom Stahl her bekannte Abbrennschweißverfahren anzuwenden. Hierbei werden beide Oberflächen flüssig. Die Verschweißung erfolgt durch schlagartige Vereinigung der Stäbe, wobei die flüssige Zwischenschicht mitsamt den Schlackeneinschlüssen als Grat austritt. Bei der Versuchsdurchführung auf der Stumpfschweißmaschine sprangen vom Aluminiumstab größere Stücke explosionsartig ab. Ein Verbund war daher nicht zu erzielen.

Bei der Hammerschweißung ist es möglich, größere Drücke anzuwenden, da das Material weniger gut ausweichen kann als beim Stumpfschweißen. Beide Stäbe wurden an ihren Enden abgeschrägt, getrennt mit je einem Schweißbrenner bis dicht unter den Schmelzpunkt erwärmt, mit den schrägen Endflächen aufeinandergelegt und durch einen kräftigen Hammerschlag bearbeitet. Das Ergebnis war wieder negativ, da die Oxydschicht auf beiden Stäben den Verbund verhinderte. Einbringen des Aluminiumstabes in ein beidseitig verschlossenes Kupferrohr gemäß Abb. 3 sollte die Möglichkeit einer Oxydbildung ausschließen. Das Rohr wurde bei

600°C mit kräftigem Hammerschlag breitgeschlagen. Durch den Druck hatte das Kupferrohr an einigen Stellen Risse erhalten und flüssiges Metall war herausgespritzt. Es handelte sich hierbei, wie der Schliff zeigte, um das niedriger schmelzende Eutektikum Aluminium- Al_2Cu (Abb. 2). Nicht nur an dem in Abb. 3 mit B—B bezeichneten Querschnitt, sondern auch im Querschnitt A—A ist ein Verbund zwischen Aluminium und Kupfer eingetreten, wobei sich eine Zwischenschicht aus dem erwähnten Eutektikum gebildet hat. Mit diesem Versuch näherten wir uns sehr stark der bei der Erzeugung des Cupals angewandten Arbeitsmethode. Wir versuchten nun weiterhin, dieses Verfahren zum Zweck der Verbindung von Stäben entsprechend umzugestalten.

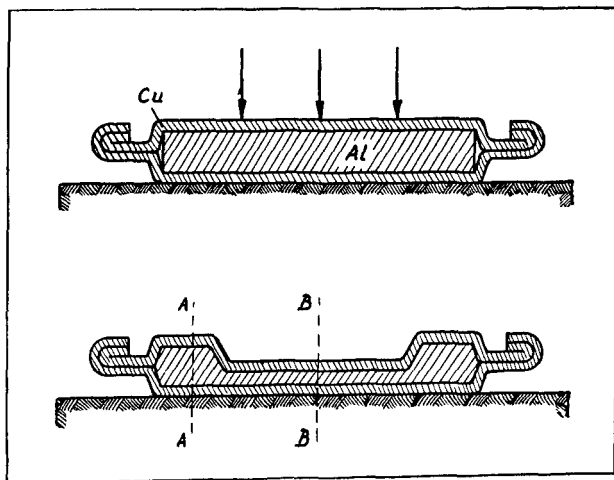


Abb. 3. Verformung eines Kupferrohres und einer darin eingeschlossenen Aluminiumprobe zwecks Erzielung des Verbundes.

Erzielung des Verbundes an Stäben

Aus den Vorversuchen ergaben sich für das Verschweißen von Stäben aus Aluminium und Kupfer unter Druck folgende Forderungen:

Die Temperatur muß oberhalb der eutektischen Temperatur von 548°C (Abb.2) liegen;

die Oberflächen der beiden Metalle müssen oxydfrei sein;

der Verbund muß in einer geschlossenen Form erfolgen, um einerseits den notwendigen Druck aufzubringen und andererseits die Stäbe in ihrer Lage festzuhalten, bis die Zwischenschicht unter die eutektische Temperatur abgekühlt und fest geworden ist.

Die Form wurde zweiteilig ausgeführt, um die Stäbe leicht herausnehmen zu können (Abb.4). Die zwei Formhälften sind durch Schellen zusammen-

gehalten. In Höhe des Verbundes ist eine Nut vorgesehen; durch seitliches Ausweichen des Materials in diese Nut sollen oxydfreie Berührungsflächen für den Verbund erhalten werden. Eine konische Bohrung am Boden der Vorrichtung gestattet die Einführung eines Thermoelementes. Der erforderliche Druck wird durch Hammerschläge unter Zwischenschaltung eines leicht in der Bohrung laufenden Dornes auf die Stäbe ausgeübt. Zum Erwärmen der Form und der in ihr befindlichen Stäbe diente ein widerstandsgeheizter Muffelofen. In einem ersten Versuch wurden die Stäbe mit platten Enden so aufeinandergelegt, daß der Aluminiumstab unten lag und mit der Oberkante der Nut abschloß. Hierdurch sollte die ober-

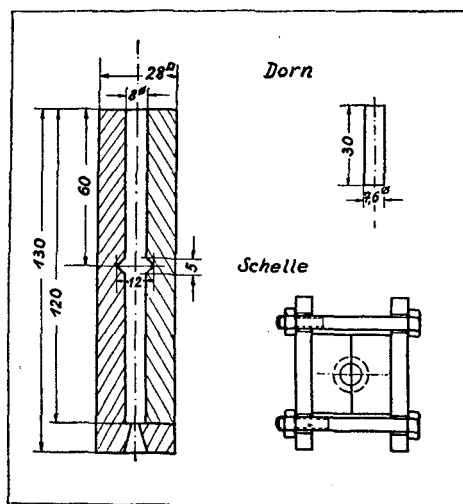


Abb. 4. Zweiteilige Form zur Herstellung der Preßschweißung.

ste Schicht der Stäbe mit den Oxyden eine Ausweichmöglichkeit erhalten, so daß bei weiterer Verformung die blanken Metalle in Berührung kamen. Form und Stäbe wurden 45 min bei 580°C angewärmt. Vier leichte Hammerschläge auf dem Amboß quetschten das Aluminium in die Nut, beim Öffnen der Form fielen die Stäbe aber auseinander, da eine starke Oxydschicht den Verbund verhindert hatte.

Auch die Wiederholung des Versuches unter Verwendung von Schweißpulver und Erhöhung der Temperatur auf 600° brachte keinen Erfolg, da das Schweißpulver noch als trennende Schicht zwischen den Stäben lag. Der Mißerfolg bei diesen Versuchen wird durch die in Abb. 5a skizzierte Vorstellung erklärt. Hierbei ist angenommen, daß infolge der Reibung an der Berührungsfläche zwischen Aluminium und Kupfer die oberste — kalottenartig schematisierte — Aluminiumschicht die Abwärtsbewegung des Kupfers unverändert mitmacht, so daß erst die tiefer liegenden Aluminiumschichten in die Wulst

ausweichen. Die Oxydschicht bleibt somit bei der platten Form der Stäbe unverändert.

Auf Grund dieser Erkenntnis wurde nun der Aluminiumstab angespitzt und der Kupferstab flacher kegelig ausgebohrt (Abb. 5b). Die Erwärmung auf 640°C erfolgte in reduzierender Atmosphäre. Hierzu erhielten die Trennfugen der Form eine Auflage von Kohlepulver, die Vorrichtung wurde in eine Tonerdepackung gelegt, um den Zutritt der Luft zu verzögern. Das Ergebnis des anschließenden Stauchversuches war unbefriedigend, die Stäbe konnten mit geringer Gewalt von Hand auseinandergebrochen werden, da der Verbund nur an

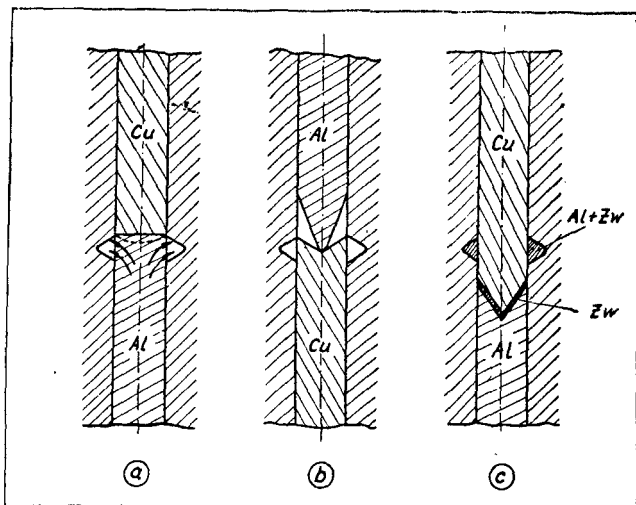


Abb. 5. Bei den Versuchen angewandte Stabformen (Zw: Zwischenschicht).

einzelnen Stellen erfolgt war. Der Kupferstab hatte sich nicht verformt, nur geringe Mengen Aluminium waren in die Wulst gedrungen. Eine Wiederholung des Versuches bei 580° , wo das Aluminium noch fester ist, und Nachglühung bei 400°C brachte insofern eine Verbesserung, als die Stäbe von Hand nicht mehr auseinandergebrochen werden konnten. Einzelne Lufteinschlüsse im Gefüge zeigten jedoch, daß der Verbund noch nicht vollständig war.

Einen vollen Erfolg brachte erst eine weitere Abänderung des vorigen Verfahrens, wobei die Stäbe vertauscht waren, nämlich der Kupferstab angespitzt und der Aluminiumstab flacher kegelig ausgebohrt. Dieser reichte wieder bis zur Oberkante der Nut. Das Ziel solcher Anordnung war nun ein Zerreißen der Aluminiumoberfläche, Ausweichen der obersten Aluminiumschicht in die Nut bei gleichzeitigem Entlangschmieren an der Kupferspitze. Die Erwärmungsdauer der Stäbe enthaltenden Form bei 620°C betrug eineinhalb Stunden, die Verformung erfolgte auf dem Amboß mit vier kräftigen Hammerschlägen. Anschließend wurde noch 16 Stunden bei 300°C geglüht, doch ist anzunehmen, daß der Erfolg auch schon vor dieser Glühung eingetreten war. Der Stab konnte von Hand nicht mehr zerrissen werden, der Schliff zeigte einwandfrei gleichmäßigen Verbund, wobei die Dicke der Zwischenschicht $0,7\text{ mm}$ betrug. Das Aluminium war zunächst in die Wulst ausgewichen und wurde dann durch den Kupferstab stark gestaucht (Abb. 5c).

Der vorige Versuch wurde wiederholt, wir verzichteten jedoch auf das Nachglühen, öffneten vielmehr die Form eine Minute nach dem Stauchen und ließen den Stab an Luft abkühlen. Es war einwandfreier Verbund ein-

getreten, das Nachglühen ist somit überflüssig. Auch die langsame Abkühlung, die diesen Versuch beendete, war nicht notwendig; Abschrecken der Stäbe in Wasser nach dem Stauchen in einem folgenden Versuch beeinträchtigte nämlich den Verbund keineswegs. Da die zuletzt angewandte Formgebung der Stäbe offenbar ein gutes mechanisches Herausquetschen der Oxyde gewährleistete, wurde weiterhin versuchsweise auf die reduzierende Atmosphäre in der Form verzichtet. Die Packungen aus Kohlepulver und Tonerde fielen somit weg, und die Erwärmung der Stäbe in der Form konnte schon innerhalb von 45 Min. erfolgen. Auch bei dieser vereinfachten Arbeitsweise erhielten wir den gleich guten Verbund wie oben.

Prüfung der Verbindung, Verbesserung und Erweiterung des Arbeitsverfahrens

Bei der Durchführung der Versuche war die überraschende Beobachtung gemacht worden, daß bei der Herstellung des Verbundes unter Druck an der Berührungsstelle der beiden Metalle eine flüssige Legierung entsteht, obwohl die Arbeitstemperatur unterhalb der Schmelztemperatur des Aluminiums lag. Die mikroskopische Untersuchung des Verbundes zeigte, daß es sich hierbei um das bei 548° schmelzende Eutektikum Aluminium- Al_2Cu handelt (Abb. 6). Es ist erstaunlich, welchen Umfang diese Reaktion zwischen festen Metallen und sich bildender Schmelze im Bruchteil einer Sekunde annimmt. Die Kupferoberfläche wird dabei stark angefressen, z.T. sogar unter Umgehung einzelner Kupfermassen, die dann als Inseln im Eutektikum eingelagert sind.

Weitere kupferreichere Verbindungen des Zustandsschaubildes Aluminium—Kupfer traten in solch dünner Schicht auf, daß sie nicht sicher nachgewiesen werden konnten. Die Härteprüfung des Längsschnittes mit der Vickerspyramide unter einer Prüflast von 5 kg lieferte folgende Werte:

Gefügebestandteil	H_{p5} kg/mm ²
Geschweißter Stab:	
Aluminium	26
Kupfer	61
Zwischenschicht	192
Cupal:	
Aluminium	35
Kupfer	52

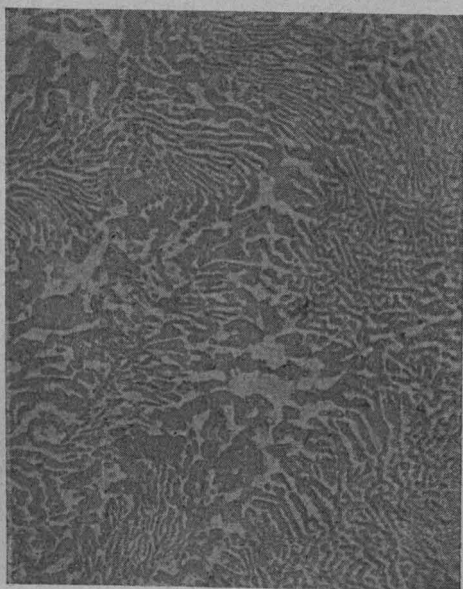


Abb. 6. Zwischenschicht in stärkerer Vergrößerung. Eutektikum Aluminium — Al_2Cu . Ungeätzt. 500:1.

Mit Rücksicht auf die Sprödigkeit der eutektischen Zwischenschicht sollte diese bei der Herstellung des Verbundes möglichst dünn

gehalten werden. Hierzu wurde eine Versuchsreihe bei verschiedenen Temperaturen durchgeführt. Die sonstigen Arbeitsbedingungen entsprechen dem zuletzt beschriebenen Versuch. Jeder Stab wurde axial aufgeschnitten (Abb. 7) und die Dicke der Zwischenschicht nahe der Spitze des Verbundkegels gemessen.

Trotz der Streuung der Werte, die in Abb. 8 zu erkennen ist, besteht einwandfrei eine Abnahme der Zwischenschichtdicke mit fallender Temperatur, bis unterhalb der theoretischen Grenze von 548°C keine Zwischenschicht mehr auftritt und also auch der Verbund unterbleibt. Bei dem angewandten kleinen Querschnitt war der Verbund bei den niedrigen Temperaturen nicht immer einwandfrei, so daß sich hier eine Temperatur von 600°C empfiehlt (vgl. unten).

Die Zugfestigkeit sollte an drei Verbindungsstücken ermittelt werden. Die erhaltenen Werte zwischen $6,9$ und $7,2 \text{ kg/mm}^2$ stellen aber die Zugfestigkeit von Aluminium dar, da die Stäbe in jedem Fall auf der Aluminiumseite nach erfolgter Einschnürung rissen. Der Verbund verformte sich nicht. Wenn die Verbindungen somit ausreichende Zug- und damit auch Biegefestigkeit aufweisen, so muß doch betont werden, daß sie sich für plastische Verformungsarbeiten nicht eignen. Zwar hielten Versuchsstücke kleine Biegearbeiten aus, sie brachen aber bei stärkerem Verbiegen längs der kegelförmigen Zwischenschicht auseinander.

Die Messung des elektrischen Widerstandes eines Verbindungsstückes mit dem Dieselhorst-Kompensator wurde im Institut für Technische Physik dank dem Entgegenkommen von

Herrn Prof. Dr. Justi durchgeführt. Die Versuchslänge betrug 52 mm , wovon etwa 27 mm auf Kupfer, 25 mm auf Aluminium entfielen, der Versuchsquerschnitt war $50,2 \text{ mm}^2$. Von dem gemessenen Wert des Widerstandes, $2,435 \cdot 10^{-5} \Omega$, kann man rechnerisch etwa $0,91 \cdot 10^{-5} \Omega$ dem Kupfer, $1,35 \cdot 10^{-5} \Omega$ dem Aluminium zuordnen, so daß auf den Verbund ein Wider-

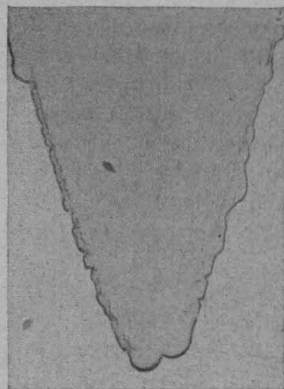


Abb. 7. Längsschliff durch die Verbindungsstelle. Weiß: Aluminium, hellgrau: Kupfer, dunkelgraue Trennlinie: Zwischenschicht. Ungeätzt. 6:1.

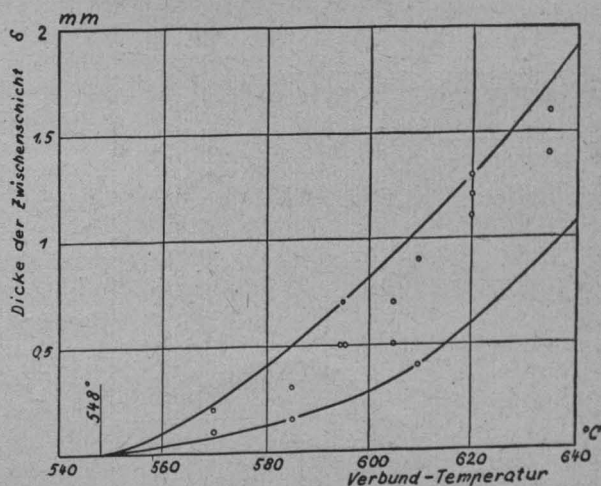


Abb. 8. Dicke der eutektischen Zwischenschicht bei den verschiedenen Arbeitstemperaturen.

stand von etwa $0,18 \cdot 10^{-5} \Omega$ entfällt. Diesen Widerstand kann man sich anschaulich ersetzt denken durch eine zusätzliche Länge des Kupferstabes von etwa 5 mm. Die obige Rechnung ist nicht genau, da die Trennfläche zwischen Aluminium und Kupfer nicht eben, sondern kegelförmig ist. Hinsichtlich des Stromdurchganges erscheint diese Kegelform günstiger als eine ebene Berührungsfläche.

Da für eine etwaige Herstellung der geschweißten Stäbe in Serie ein Erwärmen der Formen sehr unwirtschaftlich ist, wurde weiterhin versucht, den Vorgang der Erwärmung der Stäbe von demjenigen des Zusammenpressens in der Form zu trennen. Die Stäbe wurden daher in einem dünnwandigen Tonröhrchen auf 630° erwärmt, innerhalb einiger Sekunden in die kalte Form eingesetzt und gestaucht. Das angewandte Verfahren ergab einen einwandfreien Verbund. Die Dicke der Zwischenschicht entsprach nicht der Temperatur von 630°C wie bei früheren Versuchen in der miterwärmten Form, sondern einer solchen von etwa 580° . Die Wiederholung des Versuches mit nur einem einzigen Hammerschlag zeitigte das gleiche Ergebnis. Dies wäre wichtig im Falle einer Fertigung mittels Exzenterpresse oder Federhammers.

Bei der Anwendung des Verfahrens auf 20 mm dicke Stäbe griffen wir nach einigen Fehlschlägen infolge Verwendung eines innen glatten Druckzylinders wieder auf die bei den 8 mm-Stäben bewährte Form mit Nut zurück. Ein Versuch bei 610°C ergab guten Verbund, die Zwischenschicht war aber bis zu 3 mm dick und wies an einigen Stellen Löcher durch Gaseinschlüsse

auf. Hieraus wird gefolgert, daß man bei diesen großen Querschnitten erheblich dichter an die 548°C -Grenze herangehen kann. So erklärt sich auch, daß bei den großen Verbundflächen, wie sie bei der Herstellung des Cupals vorliegen, eine Temperatur von nur 560°C angewandt werden kann. Dadurch kommt es dort zur Ausbildung einer sehr dünnen Zwischenschicht. Durch das anschließende Auswalzen wird sie weiter verdünnt, so daß sie im Schliff bei 150-facher Vergrößerung kaum noch festzustellen ist. Dementsprechend ließ sich ein Streifen

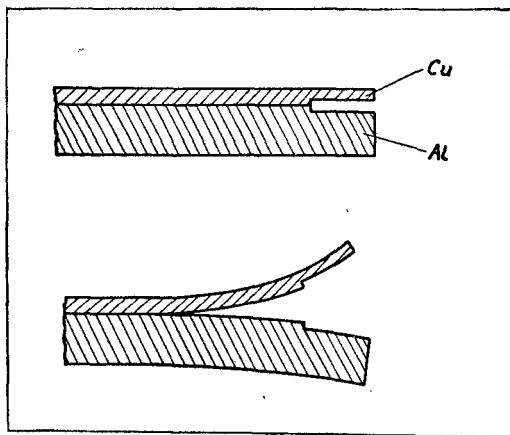


Abb. 9. Mechanische Trennung des Cupals in zwei Schichten.

Cupal zur Kupfer- und zur Aluminium-Seite hin um 180° scharfkantig biegen, ohne daß der Verbund sich löste. Eine Trennung trat erst ein, als ein Cupalstreifen entsprechend Skizze (Abb. 9) angesägt und zerrissen wurde. Auf den Reißflächen erschien hierbei die sehr dünne rauhe Zwischenschicht von grauer Färbung.

Das in vorstehender Arbeit beschriebene Verbindungsverfahren läßt sich nicht ohne weiteres in eines der bekannten Schweißverfahren einordnen. Die meiste Verwandtschaft besteht zum Hartlöten, da man die eutektische

Zwischenschicht, die niedriger schmilzt als die zu verbindenden Teile, als Hartlot auffassen kann. Man würde also zweckmäßigerweise von einer Preßlötung sprechen. Noch besser erscheint der Ausdruck „Selbstlötung“, da das Lot ja nicht zugeführt, sondern aus den zu verbindenden Teilen durch die bloße Berührung gebildet wird.

Nach dem Gesagten muß es möglich sein, auch andere Metalle miteinander zu verbinden, bei denen ein niedriger schmelzendes Eutektikum besteht. Dies gilt insbesondere für das Metallpaar Blei-Antimon. Die Schmelzpunkte liegen hier bei 327° bzw. 630°C , der Schmelzpunkt des Eutektikums bei 251° . Für einen ersten Versuch wurde die bisher bewährte Form gewählt, das Blei reichte bis zur Oberkante der Nut, darüber befand sich der kegelig zugespitzte Antimonstab. Bei 315° erfolgte durch mehrere leichte Hammerschläge ein einwandfreier Verbund, wobei sich eine 0,4 mm dicke eutektische Schicht bildete.

Schwieriger erschien die Verbindung von Aluminium und Eisen, da der Schmelzpunkt des Aluminiums mit 660° nur um 6° über demjenigen des Eutektikums Aluminium- Al_3Fe liegt. Wegen der geringen Temperaturspanne erfolgte die Anwärmung der Stäbe bei 650° in der Form, worauf die Verschweißung mit drei Hammerschlägen bewerkstelligt werden sollte. Der Verbund schien zunächst gut zu sein. Im Zugversuch riß der Stab aber nach anfänglicher Dehnung und geringer örtlicher Einschnürung des Aluminiums plötzlich an der Verbundstelle. Die erreichte Zugfestigkeit lag mit $6,5\text{ kg/mm}^2$ dicht unter derjenigen des Aluminiums.

Zusammenfassung

Das entwickelte Verfahren besteht in der Vereinigung zweier Metalle im Bereich zwischen der Schmelztemperatur des tiefer schmelzenden Metalles und derjenigen eines noch niedriger schmelzenden Eutektikums unter Anwendung von Druck. Im Falle des Aluminiums und Kupfers, womit sich vorliegende Arbeit in der Hauptsache beschäftigt, reicht die Temperaturspanne von 660° bis 548° , dem Schmelzpunkt des Eutektikums Aluminium- Al_2Cu . Durch die Formgebung der zu verbindenden Teile — Anspitzen des Kupfers, flach kegeliges Ausbohren des Aluminiums — wird das Zerreißen der Oxydhäute und Entweichen des Oxydes und flüssigen Eutektikums in eine wulstförmige Nut bewirkt. Während der Entstehung des Verbundes dürfen zwischen den Berührungsflächen der Metalle mit Rücksicht auf das dort sich bildende Eutektikum nicht die geringsten Zugkräfte auftreten. Ein Verbund ist grundsätzlich auch unterhalb der eutektischen Temperatur denkbar, wobei die Zwischenschicht hier durch Diffusion im festen Zustand gebildet wird. Das Zerreißen der Oxydhäute bei diesen tieferen Temperaturen erfordert aber wesentlich höhere Druckkräfte.

Die als Preßlötung oder Selbstlötung bezeichnete Arbeitsweise erwies sich außer bei Aluminium—Kupfer noch erfolgreich bei Blei—Antimon; auch bei Aluminium—Eisen wurde ein gewisser Anfangserfolg erzielt.

Das Verfahren, das wir auf Grund einer Anregung der Hannoverschen Stromversorgungs-A.G. 1948 ausgearbeitet hatten, ist 1949 von den Ver-

fassern in Westdeutschland zum Patent angemeldet worden. Kurz vor Drucklegung dieser Arbeit nahmen wir von einer in „Werkstatt und Betrieb“, Bd.82 (1949), S.181 referierten amerikanischen Arbeit*) Kenntnis, die sich ebenfalls mit der Verschweißung von Aluminium und Kupfer beschäftigt. Das Problem wird dort mit Hilfe der elektrischen Widerstandsschweißung gelöst, mit der wir in den Vorversuchen keinen Erfolg hatten. Es geht aus dem Referat nicht hervor, ob die Verschweißung nach diesem Verfahren auch bei Stäben mit nur 8 mm Durchmesser, wie wir sie verwendeten, möglich ist.

*) R. T. Gillete, Mat. and Meth., N.Y., Juli 1948, S.70—73.